



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(бакалаврская работа)

На тему «Алгоритмы распознавания метеорологических явлений в AUTO METAR»

Исполнитель Филимонова Юлия Геннадьевна  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор физико-математических наук, профессор  
(ученая степень, ученое звание)

Кузнецов Анатолий Дмитриевич  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

  
(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор  
(ученая степень, ученое звание)

Кузнецов Анатолий Дмитриевич  
(фамилия, имя, отчество)

« 1 » июня 2020 г.

Санкт-Петербург  
2020

## СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
СОКРАЩЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1 Алгоритмы формирования кода METAR	8
1.1 Назначение и вид кода	8
1.2 Логическая последовательность формирования сводки METAR	9
1.2.1. Видимость	9
1.2.2 Группа текущей погоды	12
1.2.3 Облачность и вертикальная видимость	14
1.2.4 Температура и влажность воздуха	15
1.2.5 Приземный ветер	16
1.2.6 Давление	17
1.2.7 Группа предшествующей погоды	17
1.2.8 Сдвиг ветра	17
1.3 Методы измерения метеорологических параметров	18
1.3.1 Видимость	18
1.3.2 Температура и влажность воздуха	25
1.3.3 Облачность	27
1.3.4 Ветер	33
1.3.5 Атмосферные явления	35
2 Основы теории метелей	38
2.1 Понятие метели. Классификации	38
2.2 Структура метелевого переноса	40
2.3 Верхняя граница низовой метели	42
2.4 Скорость ветра, соответствующая началу дефляционной метели	45
3 Разработка алгоритма для автоматического распознавания низовой метели	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	56



## СОКРАЩЕНИЯ

МДВ – метеорологическая дальность видимости

MOR – метеорологическая оптическая дальность

RVR – дальность видимости на взлетно-посадочной полосе

ВНГО – высота нижней границы облачности

ИКАО – международная организация гражданской авиации

ВС – воздушное судно

ВПП – взлетно-посадочная полоса

КРАМС – комплексная радиотехническая аэродромная метеорологическая станция

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина

ИИ – искусственный интеллект

ФИ – фотометр импульсный

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в век искусственного интеллекта и высоких информационных технологий все стремительней развивается процесс замены человека на автоматические системы во многих сферах жизни. Если еще несколько десятков лет назад машины могли производить только простейшие вычислительные операции, то на сегодняшний день ситуация иная: ИИ уже способен распознавать речь людей, выполнять творческие задачи, разрабатывать экономические схемы, приносящие прибыль и многое другое.

Прогресс не обошел стороной и сферу наблюдений в авиационной метеорологии, так как именно эта область требует максимально возможной точности и оперативности измерений. В настоящее время на всех аэродромах России установлены автоматические измерительные системы, выполняющие следующие задачи: измерение, сбор и обработка метеорологических величин на аэродромах, представление информации в виде, удобном для потребителя, формирование метеорологических сообщений в требуемых формах, распространение информации по каналам связи в виде кодовых форм.

Одним из основных кодов в авиационной метеорологии является код METAR, на основе которого пилотами воздушных судов принимаются решения о возможности или невозможности эксплуатации конкретного аэродрома. Данное сообщение содержит всю необходимую информацию о состоянии погоды на территории аэродрома и его окрестностей. Долгое время авиационные измерения погоды и формирование сводки осуществляли исключительно метеонаблюдатели, которые, к сожалению, не всегда точно, достоверно и что особенно важно, оперативно, могут оценивать состояние окружающей среды. Поэтому в последние годы, с усовершенствования приборостроения и методов измерения и анализа метеорологических величин, эту работу в большей степени выполняют измерительные системы, которые, несомненно, эффективней выполняют

задачи фиксации значений метеорологических величин: температуры, влажности, давления, параметров ветра, высоты нижней границы облаков и видимости. Но, к сожалению, существует проблема автоматического распознавания некоторых опасных для авиации явлений погоды, таких как пыльная и песчаная буря, низовая/пыльная/песчаная метель. До сих пор ни на одном аэродроме России этот процесс не автоматизирован, поэтому на сегодняшний день полностью заменить работу авиационного метеонаблюдателя машинными алгоритмами невозможно.

Физика процессов многих атмосферных явлений очень сложна, поэтому оценка наличия или отсутствия какого-либо из перечисленных явлений одним лишь датчиком не представляется возможным. Поэтому для распознавания опасных явлений применяются алгоритмы, включающие широкий спектр возможных вариантов состояния погоды, при которых данное явление происходит. Такие схемы, естественно, создаются человеком на основе экспериментальных данных, теоретических сведений и личного опыта.

Меня эта тема очень заинтересовала, и в данной работе я решила попытаться ответить на вопрос: а возможно ли создание такого алгоритма для автоматического распознавания низовой метели. На мой взгляд, это явление среди всех вышперечисленных является наиболее значимым для территории России. Особенно это важно для северных аэродромов, где вылеты выполняются не так часто, как на европейской территории РФ, и привлечение метеонаблюдателей в данном случае является нецелесообразным, так как это требует определенных финансовых затрат и ценных человеческих ресурсов. К тому же, по моему мнению, при определении некоторых атмосферных явлений человек зачастую основывается на собственных представлениях о них, что не всегда соответствует действительности.

Поэтому **целью данной работы** является разработка алгоритма, результатом которого будет распознавание низовой метели и автоматическое включение ее в сводку METAR.

В ходе работы выполняются следующие **задачи**: изучение теоретических сведений о метелевом переносе, анализ фактических данных аэродрома Пулково за 2016-1018 гг, выявление влияния метеорологических условий на образование метелей.

**В первой главе** объяснена структура кода METAR, даны основные требования к представлению кодируемой информации и описаны наиболее популярные методы их измерения.

**Вторая глава** посвящена изучению теории, раскрывающей принципы возникновения низовых метелей.

**В третьей главе** приведен предложенный алгоритм для автоматического распознавания исследуемого явления.

# 1. Алгоритмы формирования кода METAR

## 1.1 Назначение и вид кода

METAR – код, использующийся в авиационной метеорологии для передачи фактической погоды на аэродроме. Сообщение формируется и передается каждые 30 минут по результатам регулярных наблюдений.

Форма записи кода выглядит следующим образом:

1)METAR 2)CCCC 3)YYGGggz 4)NIL 5)AUTO 6)dddffGfmfm [mps/kt]  
dndndnVdxdxdx 7) (VVVV/CAVOK /VnVnVnVnDv/RDrDr/VrVrVrVri)  
8)w'w' 9)[NsNsNshshshs/VVhshshs/NSC/NSD] 10)T'T'/Td'Td' 11)QPhPhPhPh  
12)REw'w' 13) [WS RD<sub>R</sub>D<sub>R</sub>/WS ALL RWY]  
14) (WT<sub>S</sub>T<sub>S</sub>/SS')/(WT<sub>S</sub>T<sub>S</sub>/HH<sub>S</sub>[H<sub>S</sub>][H<sub>S</sub>]) 15)(RD<sub>R</sub>D<sub>R</sub>/E<sub>R</sub>C<sub>R</sub>e<sub>R</sub>e<sub>R</sub>B<sub>R</sub>B<sub>R</sub>)

Где

1. Идентификатор кода
2. Индекс аэродрома, к которому относится сообщение
3. Группа, показывающая срок наблюдения - число месяца/час/минута по UTC
4. Идентификатор отсутствия сводки в срок наблюдения
5. Идентификатор сводки, содержащей данные, формируемые автоматической метеорологической станций
6. Группа приземного ветра. Содержит информацию о скорости, направлении ветра, порывах у земли
7. Данные о видимости
8. Группа, включающая особые явления текущей погоды с указанием их интенсивности
9. Группа облачности/вертикальной видимости
- 10.Группа, содержащая данные о температуре воздуха/температуре точки росы



11. Давление, приведенное по стандартной атмосфере к уровню моря
12. Группа, содержащая информацию о явлениях погоды, зафиксированных на аэродроме не в срок наблюдения: в последний истекший час либо после последней выпущенной сводки, в зависимости от того, какой из вышеперечисленных периодов меньше
13. а) Данные о наличии сдвига ветра с указанием номера ВПП
13. б) Группа используется, если сдвиг ветра оказывает влияние на все ВПП
14. Температура воды на поверхности моря и состояние моря или значительная высота волн
15. Информация о состоянии ВПП, включающая в себя номер ВПП, отложения на полосе, степень ее загрязнения, высоту отложений и коэффициент сцепления

## 1.2 Логическая последовательность формирования сводки

### 1.2.1. Видимость

В коде METAR указывается преобладающая видимость «VVVV»

Преобладающая видимость – значение видимости, которое зафиксировано в пределах, по меньшей мере, либо половины линии горизонта, либо половины поверхности аэродрома [3].

Минимальная видимость «VnVnVnVnDv» сообщается, если:

1. Ее значение не превышает 1500 м либо 50% преобладающей видимости. В таком случае минимальная видимость передается в сводке METAR с указанием направления. Если же минимальная видимость зарегистрирована сразу в нескольких направлениях, требуется передать наиболее важное направление с точки зрения эксплуатации ВС.

2. Нет возможности установить преобладающую видимость вследствие быстрого изменения этой величины. В данном случае следует указывать значение минимальной видимости, но без обозначения направления.

Передаваемая в коде METAR видимость должна быть величиной, осредненной за последние 10 минут перед формированием сводки. Если за последний 10-минутный интервал было зафиксировано резкое изменение значения видимости, то осреднение должно производиться за период после данного изменения.

Принято считать изменение резким, если в течение как минимум двух минут происходит устойчивое изменение величины, и значения видимости достигают либо превышают критерии сводки SPECI: 800 м, 1500 м, 3000 м.

Видимость округляют в меньшую сторону.

Дискретность передачи видимости в сводке METAR представлена в таблице 1.2.1.1:

Таблица 1.2.1.1– Дискретность передачи значений видимости в коде METAR

Значение видимости, м	Дискретность передачи информации
< 800	Кратно 50
800-5000	Кратно 100
5000-10000	Кратно 1000
> 10000	«9999»

Отдельно стоит рассмотреть дальность видимости на ВПП.

Определение RVR должно производиться на всех взлетно-посадочных полосах, предназначенных для взлета/посадки. Значения дальности видимости на ВПП указывают в тех случаях, когда она составляет менее 2000 м. Нижним пределом измерения RVR считается значение 50 м.

Правила передачи RVR в сводке METAR представлены в таблице 1.2.1.2:

Таблица 1.2.1.2 – Дискретность передачи дальности видимости на ВПП

Значение RVR, м	Дискретность передачи
< 400	Кратно 25
400-800	Кратно 50
> 800	Кратно 100

Значение дальности видимости на ВПП всегда округляется в меньшую сторону до указанных кратных значений. Если величина RVR составляет больше 2000 м, указывается «P2000», меньше 50 м – «M50».

Кроме самого значения видимости в данном случае также указывается тенденция изменения этой величины за последний 10-минутный интервал, предшествующий сроку наблюдения. Тенденция определяется следующим образом: если среднее значение видимости за первые 5 минут отличается более чем на 100 м от осредненного значения за последние 5 минут 10-минутного интервала, то вместо «i» указывается символ «U» при увеличении видимости, «D» – при ее уменьшении, и буква «N» в случае, если разница не превышает 100 м. Если определить тенденцию не представляется возможным, то «i» не указывается.

Если в течение 10-минутного интервала, предшествующего сроку наблюдения, зафиксировано резкое изменение RVR, то указываются значения RVR, полученные после этого изменения.

В сообщении METAR рекомендуется сообщать только значение RVR, определенное для зоны приземления ВС. Если для посадки возможно использование нескольких ВПП, указывается несколько значений RVR с обозначением полос, для которых эти значения определены (но не более четырех)

### 1.2.2. Текущая погода

Группа текущей погоды включает в себя данные об атмосферных явлениях, осадках, которые были зафиксированы в срок наблюдения. Данная информация должна быть репрезентативна для аэродрома, а в отдельных случаях – и для его окрестностей. В коде METAR одновременно могут передаваться несколько групп текущей погоды, но не более трех.

Последовательность передачи информации следующая:

1. а) Указывается интенсивность, соответствующая сроку наблюдения: знак «+» соответствует сильной интенсивности, знак «-» – слабой. Данный указатель может быть включен с пыльной/песчаной бурей; с осадками; с осадками, связанными с грозами/ливнями; с воронкообразным облаком. Знак интенсивности должен указываться без пробелов перед метеорологическим явлением, к которому он относится. Если наблюдается умеренная интенсивность, то ее обозначение исключается из группы.

1. б) В случае если явление было зафиксировано в окрестностях аэродрома, используется сокращение «VC». Интенсивность атмосферных явлений не указывают. Окрестностью считают территорию, примыкающую к аэродрому на расстоянии 8 – 16 км от КТА. Индекс «VC» может употребляться со следующими обозначениями: SH (ливневой), TS (гроза), FG (туман), VA (вулканический пепел), BLDU (пыльная низовая метель), BLSA (песчаная низовая метель), BLSN (снежная низовая метель), PO (пыльный/песчаный вихрь), FC (воронкообразное облако), SS (песчаная буря), DS (пыльная буря).

2. Дескриптор. В одной группе «WW» может быть использован только один из следующих дескрипторов:

«DR» – используется с сокращениями SN (для снега), SA (для песка), DU (для пыли), в случае, если перечисленные частицы подняты ветром не выше двух метров над землей.

«BL» – «низовой(-ая)». Используется с сокращениями SN (снег), SA (песок), DU (пыль) или VA (вулканический пепел), если частицы подняты ветром до высоты 2 м или более над уровнем земли. Скорость ветра должна быть по требованиям ИКАО больше 6 м/с.

«SH» – «ливневой». Употребляется со следующими обозначениями: SHRA (ливневой дождь), SHSN (ливневой снег), SHGR (ливневой град), SHGS (ливневой мелкий град/ ливневая снежная крупа). Также допустимо сочетание этих форм осадков, например, «SHRASN» и другие.

Кроме этого, существует 3 дескриптора, употребляющиеся только с туманом «FG»: MI – «поземный», то есть не выше 2 м над земной поверхностью; BC – клочья тумана, покрывающие местами аэродром; PR – «частичный», указывается в случае, когда туманом покрыта большая часть аэродрома, тогда как на остальной части туман не наблюдается.

Дескриптор «FZ» – переохлажденный – используется только с сокращениями FG (туман), DZ (морось) и RA (дождь).

Дескриптор «TS» используется для передачи сообщений о грозе в следующих формах: TSRA (когда гроза наблюдается с дождем), TSSN (гроза со снегом); TSGR (гроза с градом), TSGS (гроза с мелким градом/снежной крупой), TS (в случае, когда за 10-минутный интервал, предшествующий сроку формирования сводки, был слышен гром, но осадки не были зафиксированы).

Сокращение VCTS (гроза в окрестностях аэродрома) употребляется в METAR AUTO при наличии грозопеленгатора или МРЛ.

3. Указываются явления погоды, наблюдаемые на аэродроме. Сокращения, используемые для их кодирования, представлены в таблице ВМО №4678 (колонки 1 – 5).

### 1.2.3 Облачность и вертикальная видимость

Данные об облачности в коде METAR должны быть репрезентативны для аэродрома и его окрестности. Данная группа передает информацию о количестве и типе облаков; высоте НГО, значимой для эксплуатации ВС, а именно облачности с ВНГО менее 1500 м или ниже верхней границы минимальной высоты в секторе, в зависимости от того, какое значение больше; кучево-дождевых или мощных кучевых облаках на любых высотах.

Подгруппа «NsNsNs» указывает на количество облаков с помощью определенных сокращений, представленных в таблице 1.2.3 :

Таблица 1.2.3 – Сокращения, используемые в коде METAR для передачи информации о количестве облачности

Сокращение	Расшифровка
FEW	1-2 октанта
SCT	3-4 октанта
BKN	5-7 октанта
OVC	8 октанта
NSC	Облачности, значимой для полетов, нет
NCD	Употребляется в случае, если автоматическая система облаков не обнаружила

Далее подгруппой «hshshs» передается информация о высоте НГО в величинах, кратных 30 м /100 футам. Если нижняя граница облачности расположена ниже высоты аэродрома, то вместо значения высоты облаков указывается «///».

Группа «VVhshshs» обозначает вертикальную видимость и включается в сводку METAR вместо группы «NsNsNshshshs», в тех случаях, если состояние неба по различным причинам определить невозможно, где «VV» – идентификатор группы, «hshshs» – значение вертикальной видимости в

величинах, кратных 30 м/ 100 футам. Если данные о вертикальной видимости отсутствуют, и неба не видно, группа передается в виде «VV///».

Вертикальная видимость – это дальность видимости в вертикальном направлении в неясной среде[2].

Форма облачности указывается в METAR только в том случае, если были зафиксированы мощные кучевые или кучево-дождевые облака: обозначения TCU или CB соответственно указываются после группы «NsNsNshshshs» без пробелов.

В одной сводке METAR по необходимости (если обнаружено несколько слоев облаков) может указываться несколько групп облачности (но не более трех), в порядке возрастания ВНГО.

#### 1.2.4 Температура и влажность воздуха

Температура и влажность воздуха, передаваемая в коде METAR должна быть репрезентативна для ВПП или для всего комплекса ВПП.

Влажность воздуха в сводке передается в виде температуры точки росы. Температура точки росы – это температура, при которой водяной пар, содержащийся в воздухе, становится насыщенным (начинает конденсироваться). Чем выше температура точки росы, и чем она ближе по значению к температуре воздуха, тем больше относительная влажность.

Температура воздуха, как и температура точки росы передаются в целых градусах Цельсия; округления производятся до ближайшего целого числа, причем 0.5 градусов всегда округляется в сторону большего значения температуры (так, например, «4,5°С» округляются до 5, а «минус 4,5°С» – до 4)

Для передачи отрицательных величин используется указатель «М» непосредственно перед значением температуры (например, «M14» –минус 14 градусов Цельсия)[1].

### 1.2.5. Приземный ветер

Группа приземного ветра кода METAR включает в себя данные о ветре, осредненные за 10 минут, предшествующие сроку формирования сводки.

Первые 3 знака «ddd» обозначают направление ветра, следующие 2 – «ff» – его скорость. После чего идет сокращение «mps» или «kt», обозначающее единицы измерения скорости ветра (м/с или узлы).

В случае, если за последние 10 минут перед формированием сводки были зафиксированы отклонения от средней скорости ветра более чем на 5 м/с, то после осредненной скорости ветра указывается максимальная скорость за этот период – порыв.

При формировании сводки значение направление ветра округляется до десятка градусов по математическим законам, а скорость ветра передается с дискретностью 1 м/с.

Группа «dndndnVdxdxdx» – данные об экстремальных значениях направления – включается в сводку в том случае, если за 10-минутный интервал, предшествующий сроку наблюдения направление ветра поменялось на величину от 60 до 180 градусов при скорости ветра равной или превышающей 1,5 м/с.

### 1.2.6 Давление

В коде METAR давление сообщается группой «QPhPhPhPh», где Q – индекс группы, а «PhPhPhPh» – давление, приведенное к уровню моря, QNH. Значение передается в гектопаскалях с округлением до целого числа в меньшую сторону.



### 1.2.7 Группа предшествующей погоды

Данная группа («REw'w'») содержит информацию о метеорологических явлениях, которые были зафиксированы на аэродроме после последнего выпущенного сообщения METAR или в час, предшествующий формированию сводки, в зависимости от того, какой из этих временных интервалов короче, но не в срок формирования кода. По мере необходимости в одну сводку может быть включено несколько групп предшествующей погоды, но не более трех. Интенсивность явлений при этом не указывается, но допустимо использование дескрипторов. В случае, если сводка формируется автоматически (AUTO METAR), а система не позволяет различить тип осадков, используются обозначения: REUP, REFZUP, RETSUP, RESHUP.

### 1.2.8 Сдвиг ветра

Информация о наличии сдвига ветра между уровнем ВПП и высотой 500м передается в коде METAR группой «WS R  $D_R D_R$ », где «WS» - обозначение сдвига ветра, R – указатель полосы,  $D_R D_R$  - номер ВПП. Если сдвиг ветра оказывает влияние на все ВПП аэродрома, употребляется запись «WS ALL RWY».

1.2.9. Температура воды на поверхности моря и состояние моря или значительная высота волн

Данная информация поступает от метеостанций, располагающихся на сооружениях в открытом море в целях обеспечения безопасности полетов вертолетов. Значения температуры воды морской поверхности передаются по правилам кодирования температуры, которые описаны в п. 1.2.4. Информация о состоянии моря кодируется с использованием сокращений, представленных в таблице ВМО № 3700.

#### 1.2.10 Состояние ВПП

Данные о состоянии взлетно-посадочной полосы вносятся в сообщение в том виде, в котором они получены от аэродромных служб через органы организации воздушного движения[1].

### 1.3 Методы измерения метеорологических величин

#### 1.3.1 Видимость

В настоящее время оценка видимости на аэродромах производится преимущественно инструментальными методами. Наибольшее распространение получили базисные приборы трансмиссометры, с помощью которых можно достаточно точно определить значение метеорологической оптической дальности (MOR), которая в дальнейшем позволяет рассчитывать дальность видимости на ВПП и определять тип осадков приборными методами.

Метеорологическая оптическая дальность (MOR) – это длина пути потока света в атмосферном слое, приводящая к его ослаблению в параллельном пучке лучей от лампы накаливания до 5 % от его исходной величины [2].

MOR на данный момент считается самой объективной мерой видимости, так как при ее расчете удастся избежать многих грубых ошибок, возникающих при визуальной оценке МДВ; она может быть определена в любое время суток и не зависит от метеорологических факторов.

В основе приборных измерений метеорологической оптической дальности лежит закон Бугера-Ламберта-Бера:

$$\frac{F}{F_0} = e^{-\sigma l} \quad (1.3.1.1)$$

Где  $F$  – поток света после его прохождения расстояния  $l$  в слое атмосферы,

$F_0$  – исходный световой поток,

$\sigma$  – показатель ослабления светового потока,

$l$  – длина пути, пройденная потоком света,

Показатель ослабления показывает долю потока света, которую теряет пучок лучей при прохождении им единичного расстояния в атмосферном слое. Но на практике сам показатель ослабления напрямую не измеряется. Чаще всего оценка MOR происходит через определение коэффициента пропускания:

$$\frac{F}{F_0} = \tau \quad (1.3.1.2)$$

Из формулы (1.3.1.2) видно, что коэффициент пропускания показывает часть потока света, оставшуюся после прохождения им определенного расстояния в атмосфере (например, длина измерительной базы трансмиссометра).

Объединив выражения (1.3.1.1) и (1.3.1.2), получим:

$$\tau = e^{-\sigma l} \quad (1.3.1.3)$$

Так как MOR определяет расстояние, пройдя которое пучок света ослабевает до 5 % (0.05) от исходного значения, выражение (1.3.1.3) можно переписать следующим образом:

$$0.05 = e^{-\sigma * MOR} \quad (1.3.1.4)$$

Из этого соотношения получаем следующую зависимость метеорологической оптической дальности от показателя ослабления:

$$MOR = \left(\frac{1}{\sigma}\right) * \ln\left(\frac{1}{0,05}\right) \quad (1.3.1.5)$$

$$MOR = \frac{3}{\sigma} \quad (1.3.1.6)$$

Итак, проанализировав выражения (1.3.1.2) и (1.3.1.6), можно вывести формулу, позволяющую вычислять метеорологическую оптическую дальность через коэффициент пропускания  $\tau$  для длины пути  $l$ , пройденной световым пучком:

$$MOR = l * \frac{\ln(0.05)}{\ln(\tau)} \quad (1.3.1.7)$$

Для инструментальной оценки метеорологической оптической дальности через измерения коэффициента пропускания в настоящее время наиболее часто используются трансмиссометры. Они обеспечивают достаточно точное определение ослабления светового потока независимо от атмосферных явлений, ухудшающих видимость атмосферы (снег, пыль, дождь, туман, морось и так далее)

Принцип действия трансмиссометров представлен на рис 1.3.1:

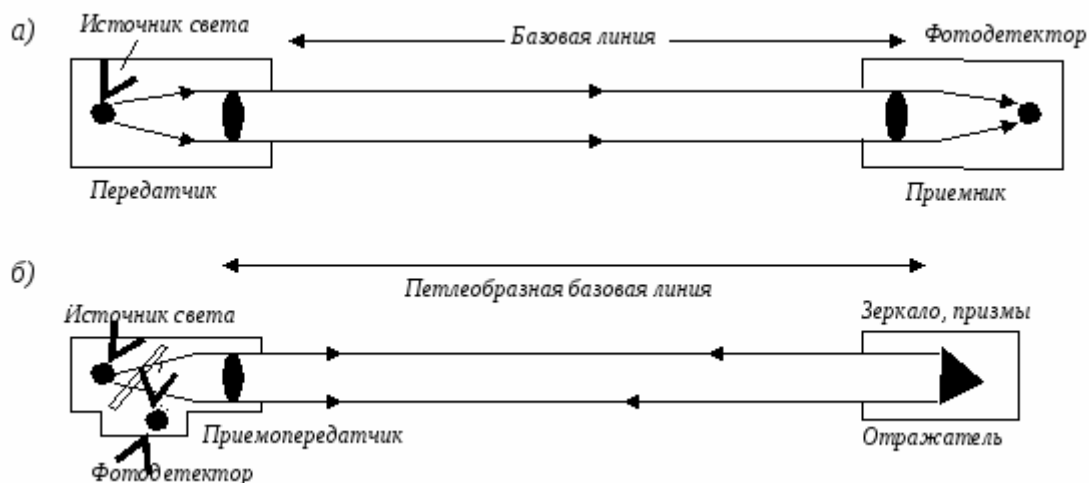


Рисунок 1.3.1.1 – Принципиальная схема измерения MOR трансмиссометрами: а) двухконечные б)одноконечные

Существует 3 основных типа реализации базисного принципа измерений MOR трансмиссометрами:

1. Двухконечные трансмиссометры (рис. 1.3.1. а). В данном случае передатчик, излучающий световые сигналы, и приемник устанавливаются на противоположных концах базы в разных блоках. При этом длина измерительной базы равна расстоянию между приемником и передатчиком (трансмиссометр «Mitras»).

2. Одноконечные (рис 1.3.1 б), когда приемник и передатчик находятся в одном блоке на одном конце базы, а на другом устанавливается отражатель. В таком случае длина измерительной базы будет определяться как удвоенное расстояние между блоком приемопередатчика и отражателем (ФИ-1).

3. Трансмиссометры, совмещающие оба варианта, когда помимо приемника, установленного в одном блоке с передатчиком, используется еще один приемник, находящийся в блоке отражателя (ФИ-3).

На точность определения MOR оказывают влияние различные факторы, наиболее значимыми из которых являются:

1. Несоответствие объемов атмосферы. Определяемый с помощью трансмиссометров коэффициент пропускания  $\tau$ , ограничен измерительной базой, длина которой, как правило, менее 100 м. Измеренный в относительно малом объеме воздуха, он по соответствующим законам (1.3.1.1) – (1.3.1.7) пересчитывается в MOR, которая может быть использована для оценки видимости в пределах всего аэродрома или определенной его части (например, RVR). Поэтому рекомендуется размещать датчики MOR как можно ближе к месту, для которого необходимо проводить оценку дальности видимости.

2. Быстрые изменения прозрачности атмосферы, влияющие на значения метеорологической оптической дальности. В связи с этим, для получения достоверных результатов, необходимо обеспечить проведение непрерывных измерений и осреднение значений MOR во времени.

3. Несовпадение оптических осей приемника и передатчика.

4. Ошибки при калибровке.

5. Загрязнения оптических компонентов датчиков видимости .

Также широкое применение для измерения дальности видимости на аэродромах получили приборы нефелометры, принцип действия которых основан на измерении показателя ослабления и вычисления MOR на его основе. Для определения показателя ослабления применяются приборы прямого и обратного рассеяния, схематично представленные на Рис. 1.3.1.2 и Рис. 1.3.1.3

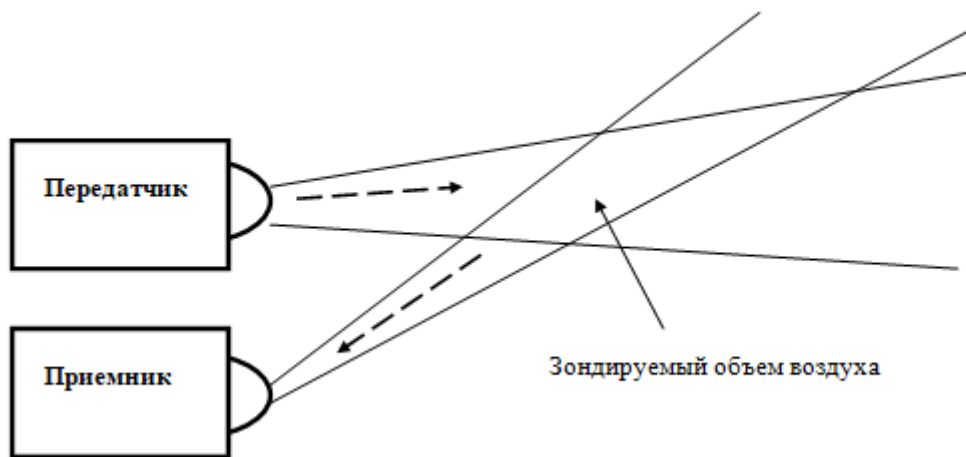


Рисунок 1.3.1.2 – Принцип действие приборов, основанных на измерении обратного рассеяния

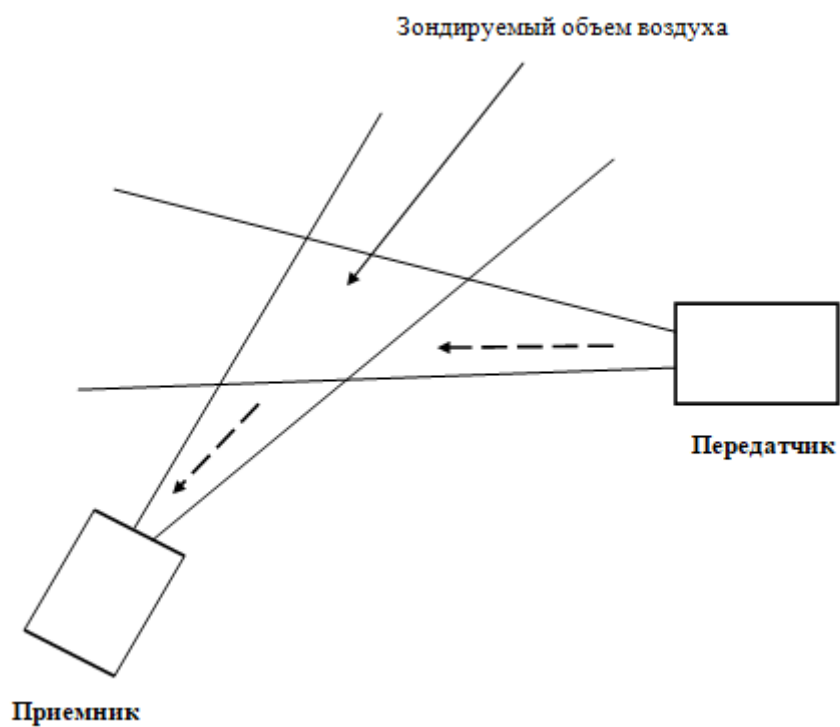


Рисунок 1.3.1.3 – Принцип действия приборов, основанных на измерении прямого рассеяния

В связи с огромным разнообразием существующих приборов для измерения видимости, встает вопрос о выборе самого оптимального из них для автоматических систем на аэродромах. Одним из таких датчиков является LT31 (Рис.1.3.1.4), отличительной особенностью которого является совмещение трансмиссометра и прибора прямого рассеяния, что позволяет расширить пределы диапазона измерения оптической дальности. Однобазовый двухконечный трансмиссометр на измерительной базе 30 м позволяет измерять MOR с погрешностью не более 7 % в диапазоне 50 – 1500 м, что дает возможность использовать данный прибор при определении дальности видимости на полосе. Датчик прямого рассеяния PWD (Рис. 1.3.1.5) позволяет измерять оптическую дальность в диапазоне 10 – 10000 м с погрешностью измерений не более 10%, увеличивая верхний предел измерений MOR с 1500 м до 10 000 м. Несомненным преимуществом является наличие в составе LT31 датчика осадков RAINCAP, который позволяет распознавать 7 типов осадков: дождь, морось, переохлажденный дождь, переохлажденную морось, снег, снег с дождем и ледяную крупу.



Рисунок 1.3.1.4 – Вид датчика LT 31



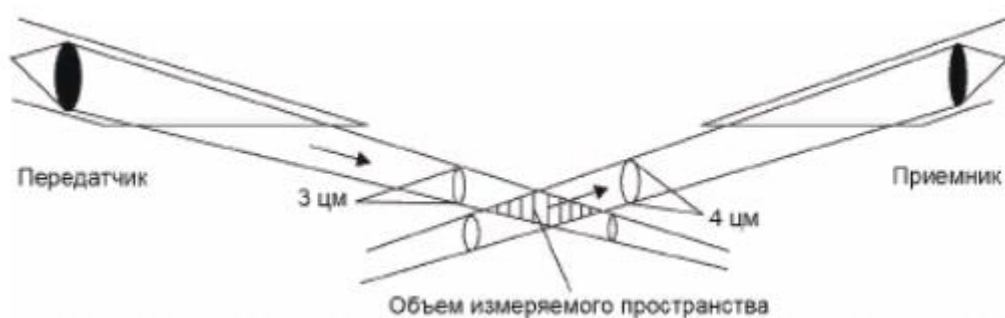


Рисунок 1.3.1.5 – Принцип измерения MOR датчиком PWD

Датчик LT31, на мой взгляд, имеет огромное преимущество по сравнению с любыми другими приборами измерения дальности видимости. Помимо выше названных достоинств при определении MOR и RVR, датчик способен распознавать 7 типов осадков, что расширяет возможности автоматического кодирования группы текущей погоды сводки METAR.

### 1.3.2 Температура и влажность

Одним из самых доступных и простых методов измерения температуры и влажности является психрометрический. Он основан на одновременном измерении температуры двумя термометрами. Первый измеряет непосредственно температуру воздуха – «сухой» термометр, а чувствительный элемент второго, «смоченного» термометра расположен, как правило, над резервуаром с водой и обернут батистом для улучшения проводимости температуры. Температура смоченного термометра всегда будет меньше (либо равна при относительной влажности 100%) температуры сухого термометра, так как в процессе испарения уменьшается внутренняя энергия жидкости, и, как следствие, температура: интенсивность испарения жидкости при текущей температуре обратно пропорциональна степени насыщения воздуха водяным паром. То есть, чем больше разность значений сухого и смоченного термометра, тем меньше относительная влажность.

Существует немало способов определения относительной влажности по показаниям данных термометров: аналитический, графический, с

помощью психрометрических таблиц. Но осуществление такого метода возможно только при участии метеонаблюдателя, поэтому в автоматических измерительных системах наибольшую популярность приобрел другой метод: измерение с помощью электрических термометров сопротивления. Их действие основывается на свойстве металлов изменять свое сопротивление при изменении их температур. Данная взаимосвязь определяется следующим выражением:

$$R_t = R_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (1.3.2.1)$$

Где  $R_t$  – сопротивление металла при температуре  $T$

$R_0$  – сопротивление металла при начальной температуре  $T_0$

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления при  $T_0$

Данная запись применима при небольшой разнице температур  $T$  и  $T_0$ . В случае, если изменение температур велико, формула приобретает следующий вид

$$R_t = R_0(1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2) \quad (1.3.2.2)$$

где  $\beta$  – температурный коэффициент сопротивления при соответствующей градуировке термометра.

Примером прибора, основанном на вышеизложенном принципе работы, является датчик НМР45D, предназначенный для непрерывного дистанционного измерения температуры и влажности. В его состав входит платиновый резистор Pt100, сопротивление которого меняется в зависимости от температурных изменений. Для измерения влажности используется емкостный датчик HUMICAP180, изготовленный из тонкой полимерной пленки. Его электрическая емкость меняется при колебаниях относительной влажности воздуха.

Измерения датчиком НМР45D производятся в следующих диапазонах:

температура воздуха – от 39,2 до 60 °С.

Относительная влажность – от 10% до 100% при температурах от -30 до 50 °С.

Погрешность составляет:

Для температуры:  $\pm 4$  °С.

Для влажности:  $\pm 5\%$  при значениях влажности от 90% до 100%,  $\pm 4\%$  при влажности от 10% до 90%.

Измерение влажности также при низких температурах может осуществить датчик относительной влажности КРАМС. Он основан на свойстве гигроскопичных материалов (в данном случае, волоса) изменять свои размеры при изменении влажности воздуха: в описываемом датчике фиксируется деформирование волосной гитары. Этот метод целесообразно использовать при температурах окружающей среды ниже 0, когда психрометрический метод измерения влажности не дает необходимую точность.

### 1.3.3 Облачность

В сводке METAR требуется передавать информацию о форме, количестве и высоте нижней границы облачности[1].

Нижняя граница облачности – самая нижняя зона, в которой прозрачность переходит от значений, соответствующих ясному небу или дымке, к значениям, соответствующим совокупности водяных капель и кристаллов льда[2].

Определение высоты нижней границы облачности в автоматических системах основывается на выявлении различий степени прозрачности между облачным слоем и атмосферой. По этой причине в основании облака может возникать световое пятно, образовавшееся от какого-либо источника света, находящегося на земле. Суть методов измерения ВНГО заключается в вычислении расстояния от источника освещения до появившегося пятна. В настоящее время его можно определить двумя способами: измерением по

угловому превышению или с помощью подсчета времени, которое затрачивает световой луч при прохождении к световому пятну и обратно до земной поверхности.

Измерение ВНГО с помощью углового превышения заключается в вычислении расстояния от светового пятна на нижней границе облака до источника света, которым может быть прожектор с вращающимся лучом либо потолочный прожектор, луч которого неподвижен и направлен вертикально вверх.

В первом случае с помощью угломерного инструмента измеряется угол возвышения светового пятна из точки, расположенной на определенном расстоянии от прожектора. Высота облака в таком случае определяется из следующего соотношения:

$$h=L*\text{tg}E \quad (1.3.3.1)$$

Где  $E$  – угол возвышения светового пятна

$L$  – расстояние от прожектора до точки, откуда измеряется угол возвышения

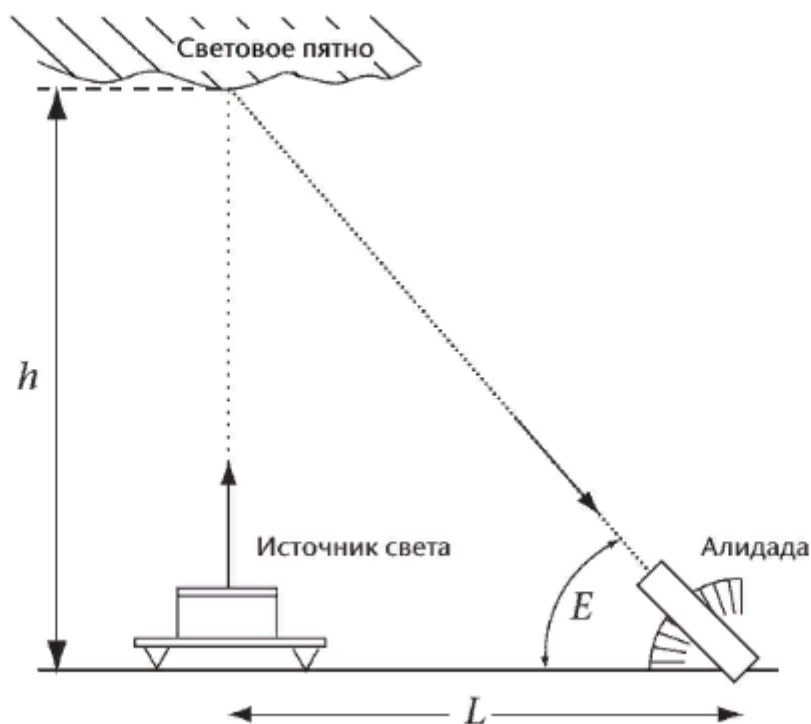


Рисунок 1.3.3.1 – Принцип определения ВНГО облачным прожектором

Этот метод нецелесообразно использовать в автоматических измерительных системах, так как он может быть осуществлен только в темное время суток.

При использовании потолочного прожектора с вращающимся лучом света устанавливаются передатчик и приемник на расстоянии 100 – 300 м друг от друга. Передатчик излучает узкий световой пучок, который сканирует облака в вертикальной плоскости пределах угла 8 – 85 градусов. Приемник включает в себя фотоэлемент, который фиксирует угол луча в тот момент, когда возникшее пятно света на облаке будет прямо над приемником.

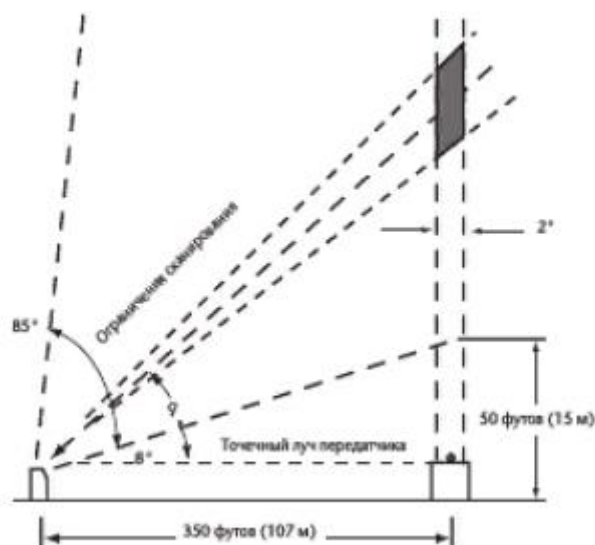


Рисунок 1.3.3.2 – Принцип определения ВНГО облачным прожектором с вращающимся лучом

Основной недостаток данного метода заключается в ошибках, связанных с наличием осадков или тумана. В таком случае прибор выдает ложные данные о высоте НГО либо не выдает их вообще. Несмотря на это,

данный принцип измерения ВНГО имеет значительную популярность на многих зарубежных аэродромах.

В России для определения высоты нижней границы облачности большое применение получили светолокационные средства измерения ВНГО. В качестве источника света используются импульсные мощные газоразрядные лампы. Приемник включает в себя фотоэлемент, принимающий отраженные от облака световые импульсы, которые в дальнейшем будут преобразованы в электрический сигнал и переданы в пульт управления. В последнем с помощью ЭЛТ или специального измерителя происходит подсчет времени между моментом излучения светового импульса до момента его приема.

Далее из следующего соотношения определяется высота НГО

$$h = \frac{ct}{2} \quad (1.3.3.2)$$

Где  $c$  – скорость света

$h$  – высота нижней границы облачности

$t$  – время, за которое световой луч проходит от передатчика до светового пятна в основании облака, а затем к приемнику.

Количество облачности в сводке METAR передается с использованием следующих сокращений: FEW (несколько), SCT (разбросанные), BKN (значительная облачность), OVC (сплошная).

До недавнего времени оценка количества облачности производилась только визуально метеонаблюдателем. В настоящее время на зарубежных аэродромах становятся популярны инструментальные методы. В некоторых государствах существуют датчики, основанные на использовании инфракрасных радиометров, которые измеряют радиационную температуру в

разных частях небосвода. При наличии облачности эта величина будет выше, чем при ясном небе. Возможные ошибки можно минимизировать, дополняя данные, полученные с таких радиометров, информацией о высоте НГО: это обеспечит довольно точную оценку количества облачности.

Другой метод заключается в обработке данных, полученных с датчиков ВНГО. Отдельные случаи нахождения облаков группируются в классы с шириной и числом их повторений в определенных диапазонах высот. Затем применяется алгоритм, суть которого заключается в объединении ближайших друг к другу по высоте классов, до тех пор, пока их не останется 5 или менее.

Группировка производится по следующему принципу:

Сначала рассчитывается расстояние между двумя соседними классами:

$$S1 = \frac{Ni1Ni2(Hi1 - Hi2)^2}{Ni1 + Ni2} \quad (1.3.3.3)$$

Где Ni, Hi-число повторений в классе «i» и его высота

Затем по такому же принципу рассчитывается разность высот между другими соседними классами и так далее. После чего два класса, имеющие меньшее расстояние друг от друга, объединяются в новый высотный класс[2].

Принцип объединения представлен в таблице 1.3.3:

Таблица 1.3.3– Минимальная разность высот между классами облаков, требуемая для их объединения

Наименьшая высота, м	Разность высот между двумя классами, м
-------------------------	---

<300	90
300-900	120
900-1500	180
1500-2400	300
>2400	480

Для передачи информации о количестве облачности в сводке METAR может быть использовано не более трех групп, поэтому группировка классов должна осуществляться до тех пор, пока их не станет 3 или менее. Затем эти данные кодируются в указанные выше обозначениях и записываются в порядке увеличения высот.

Если говорить о форме облачности, то известно, что наибольшее влияние на аэронавигацию оказывают кучево-дождевые и мощные кучевые облака, поэтому в сводке METAR сообщается только о наличии этих форм облачности. Долгое время СВ и TCU могли быть определены только визуально. В настоящее время они могут распознаваться метеонаблюдателем по данным метеорологического локатора. Конвективные облака на экранах радиолокаторов можно выявить по высокому уровню отражаемости. Но существует вероятность ошибки, связанная с тем, что высокая отражаемость также свойственна сильным осадкам. Поэтому для достоверного анализа данные с локаторов следует уточнять изображениями спутниковых снимков в инфракрасном диапазоне.

#### 1.3.4 Ветер

В сводке METAR передается информация о скорости ветра, направлении, а также максимальное значение за 10 минут, предшествующие формированию сообщения (порыв) [1].



Для измерения скорости ветра на аэродромах чаще всего используют чашечные анемометры. Скорость ветра в таких приборах преобразуется в угловую скорость вращения винта, после чего дистанционно измеряется и осредняется.

Главная характеристика данного анемометра – путь синхронизации. Путь синхронизации – это расстояние в метрах, проходимое воздушным потоком за время, в течение которого разность между угловой скоростью вращения вертушки и установившейся угловой скоростью изменится в «е» раз.

Чашечные анемометры, как правило, завышают значения фактической скорости ветра, так как для данного типа анемометров путь синхронизации при увеличении скорости больше, чем при уменьшении. Но такие приборы имеют широкий диапазон измерения и обеспечивают необходимую точность. Кроме этого, плотность воздуха, скорость перемещения которого измеряется, не влияет на линейность выходного сигнала, поэтому чашечные анемометры получили широкое применение на метеорологических станциях.

Более современными датчиками для измерения скорости ветра являются акустические (ультразвуковые) анемометры. Данный прибор создает ультразвуковой сигнал, после чего измеряется скорость его движения. Такие системы дают более точный результат, чем чашечные анемометры, за счет того, что помимо вычисления времени, за которое пройдет сигнал от передатчика к приемнику, происходит учет влажности и температуры воздуха. В настоящее время акустические датчики для измерения скорости ветра на метеорологических станциях России не используются.

Стандартным прибором для измерения направления ветра является флюгер. Он состоит из лопасти и противовеса, который направлен в сторону, откуда дует ветер. Данные о направлении ветра дистанционно (например, с помощью сельсинов) передаются на вход ПЭВМ.

В целях обеспечения аэронавигации скорость и направление ветра должны измеряться на высоте 10 м над открытой ровной местностью. Причем расстояние от датчиков параметров ветра до любого препятствия должно быть как минимум в 10 раз больше, чем высота самих препятствий.

Одним из самых современных приборов, используемых на аэродромах в настоящее время, является измеритель параметров ветра Wind 30, дающий информацию о скорости и направлении ветра.

Датчик скорости ветра состоит из зубчатого диска, анемометра и чашек. Быстрота вращения чашек прямо пропорциональна скорости ветра. Диск вращается вместе с чашками, и при вращении за один оборот генерирует выходной сигнал – 14 импульсов. Таким образом, характеристикой скорости ветра в данном датчике служит частота импульсов, определяемая из следующего выражения:

$$f = \frac{14(V - 0,232)}{1.402} \quad (1.3.4.1)$$

Где  $V$  – скорость ветра

Датчиком направления ветра является флюгер, принцип работы которого описан выше. В его состав входит диск с маской кода Грея. За каждый шаг происходит изменение на 1 бит, что также соответствует изменению угла на 5,6 градусов.

Преобразование параметров ветра в цифровой код и передача данных на вход ПЭВМ автоматической метеостанции осуществляется специальным преобразователем измерительных сигналов WAT15.

Измеритель параметров ветра Wind30 позволяет проводить измерения скорости ветра с дискретностью 1 м/с в диапазоне 0,6 – 75 м/с с погрешностью  $\pm(0,4 + 0,035V)$  м/с. Направление ветра выдается с интервалом 6 градусов, в диапазоне от 0 до 360 градусов, погрешность составляет не более 3 градусов[2].

### 1.3.5 Атмосферные явления

Стоит признать, что в настоящее время на российских аэродромах существует проблема автоматического кодирования группы текущей погоды в сводке METAR. Данная группа содержит информацию об атмосферных явлениях, наблюдающихся на территории аэродрома или его окрестностей.

Для того чтобы выявить наиболее подходящие методы измерения и кодирования явлений погоды, нужно понимать значение данного термина. К сожалению, общепринятого определения «атмосферного явления» не существует. Согласно руководству ВМО [6] все атмосферные явления (описываемые в данном документе под термином «погода») можно разделить на несколько групп:

1. Гидрометеоры – совокупность твердых и жидких частиц воды, взвешенных в атмосфере или падающих в ней, которые могут отлагаться на почве, на предметах и подниматься ветром с земной поверхности.

2. Литометеоры – скопление твердых частиц, не содержащих воды, способных находиться в атмосфере во взвешенном состоянии или подниматься в ветром с земной поверхности .

3. Электрометеоры – зрительное или звуковое проявление действия атмосферного электричества.

4. Фотометеоры – явление в атмосфере, которое возникло в результате отражения, преломления, дифракции или интерференции света [6].

Определения атмосферных явлений, подлежащих кодированию в сводке METAR, даны в документах ИКАО [1]

Для автоматического наблюдения и распознавания метеорологических явлений, оказывающих влияние на авиацию, в настоящее время появляется много датчиков, основанных на разных физических принципах

1. Оптические. Датчики такого типа (например, описанный выше, LT31) предназначенные для измерения дальности видимости, дополнительно оснащены датчиком осадков и температуры, что позволяет автоматически распознавать различные виды гидрометеоров и определять их интенсивность.

2. Акустические. К такому типу датчиков относится акустический дисдрометр, определяющий распределение капель дождя по величине: каждая капля, соприкасаясь с горизонтальной поверхностью, вызывает электрический сигнал, напрямую зависящий от её размеров. Таким образом распознаются дождь, морось, град, ледяная крупа.

3. Люминисцентные датчики. Принцип их работы основан на выявлении взаимосвязи люминесцентной частоты оптического луча с размером гидрометеоров и литометеоров, а также скоростью их движения в этом луче. Они способны достоверно идентифицировать дождь и снег, а при совмещении с акустическими датчиками – град и ледяную крупу[2].

Несмотря на кажущееся многообразие методов распознавания атмосферных явлений, в настоящее время автоматического кодирования явлений погоды на российских аэродромах не осуществляется.

## 2. Основы теории метелей

Разумеется, для того чтобы говорить о возможности или невозможности автоматизации низовой метели, необходимо четко понимать физику процесса и законы, по которым происходит метелеперенос.

В ходе работы было изучено много научной литературы, но, к сожалению, большое разнообразие гипотез, малое количество экспериментальных данных и большая погрешность опытов не дают возможность выявления однозначных закономерностей.

Но, несмотря на это, считаю важным проанализировать наиболее значимые для автоматизации темы, и рассмотреть некоторые теоретические сведения об исследуемом явлении.

### 2.1 Понятие метели. Классификации.

В общем виде под термином «метель» подразумевается перенос ветром падающего или ранее выпавшего снега.

В научной литературе разными авторами, изучающими это явление, было предложено множество классификаций метелей и критериев для их определения.

Одним из первых ученых, разделивших типы метелей, был Э.Д.Злотницкий, который представил следующую терминологическую схему:

1. Снежная буря – выпадение снега при очень сильном ветре.
2. Метель – перенос снега с поверхности земли без снегопада, при этом наблюдается сильный ветер, плохая видимость, горизонт не различим.
3. Поземок – перенос снега по поверхности земли, без выпадающего снега, при наличии умеренного ветра[5].

В 1935 г. В.Ф.Толстовым была предложена уточненная классификация, с указанием значений скорости ветра:

1. Снегопад. При скорости ветра от 0 до 5 м/с
2. Поземок. Скорость ветра от 5 до 10 м/с, снегопада не наблюдается
3. Низовая метель. Скорость ветра, как и при поземке, составляет 5 –10 м/с, но снег поднимается вверх на большую высоту.
4. Метель верховая. Возникает, если во время низовой метели происходит выпадение снега. Скорость ветра: 5 –10 м/с.
5. Буран. Фиксируется при скорости ветра от 10 до 20 м/с.
6. Ураган: скорость ветра более 20 м/с.

Еще более усовершенствованной считается классификация Б.Н.Веденисова, которая помимо силы ветра содержит дополнительную информацию о структуре метелевых частиц, а также пороговые значения температуры и влажности воздуха:

1. Снегопад. Выпадение снега из облаков при штиле.
2. Поземок. Перенос снега вдоль земной поверхности ветром без снегопада.

3. Метель. Наблюдается, если во время поземка происходит выпадения снега.
4. Буран. Фиксируется при сильном ветре и температурах ниже  $-15^{\circ}\text{C}$  –  $-20^{\circ}\text{C}$ . Сухой снег, по структуре сравнимый с песком.
5. Вьюга. Буран, но с преобладанием снежной пыли.
6. Пурга. Наблюдается при температуре воздуха ниже  $-12$  –  $-15^{\circ}\text{C}$  при большой относительной влажности.

Позже подобная терминологическая схема была предложена Л.М.Дановским, который к вышеописанной классификации добавил 2 определения:

1. Верховая метель. От простой метели она отличается поднятием снега на более высокий уровень.
2. Снежный ураган, который фиксируется при скорости ветра больше  $29$  м/с[4].

Несмотря на то, что принципы разделения метелей по различным типам у многих авторов схожи, стоит отметить, что в большей степени они отражают эмоциональную сторону явления, но не его суть: в большинстве случаев авторы предоставляют не численные значения метеорологических величин, соответствующие каждому типу метели, а их относительную изменчивость, описанную словесно.

## 2.2 Структура метелевых частиц

Изучение закономерностей переноса снега невозможно при отсутствии понимания структуры метелевых частиц. Снег является очень сложным для изучения из-за бесчисленного многообразия снежинок, их различных условий испарения, всевозможных вариаций их намерзания друг на друга, и свойств деформироваться при долговременном лежании. Это отчасти объясняет трудности выявления законов снегоперемещения.

Наиболее популярной и обоснованной среди множества классификаций является Международная классификация снега, принятая в 1957 г. Она включает 10 типов снежинок:

1. Пластинки. Это плоские кристаллы снега шестиугольной (иногда треугольной) формы
2. Плоские дендриты. Также кристаллы минимальной толщины, имеющие форму узорчатой звезды. Имеют чаще всего 6 лучей, иногда 3 и 12.
3. Простые столбики. К ним относятся кристаллы цилиндрической формы, сечение которых, как правило, представляет собой шестиугольник.
4. Иглы – тонкие кристаллы в виде цилиндров
5. Пространственные дендриты. Это кристаллы сложной формы: их лучи расходятся от центрального ядра по разным плоскостям
6. Увенчанные столбики. Это столбики, на концах которых можно увидеть пластинки
7. Неправильные кристаллы. Они включают в себя несколько беспорядочно сросшихся кристаллов.
8. Крупа. Снежинки, имеющие сферическую форму, покрытые сверху изморозью.
9. Ледяной дождь. Это капли воды, замерзающие при соприкосновении с какой-либо поверхностью.
10. Град. Ледяные зерна с гладкой поверхностью, имеющие белый, слегка просвечивающийся центр.

К группе снежных частиц, способных к ветровому перемещению, на мой взгляд, можно однозначно отнести только группы 1 – 8. Термины под номерами 9 и 10 не могут рассматриваться как частицы метелевого переноса, так как по факту являются переходными формами, и не считаются частью снежного покрова, поддающегося дефляции. Согласно представленной



классификации снега, частицы, входящие в состав снежного покрова, также разделяются на несколько групп:

1. Свежевыпавший снег классов 1 – 7
2. Мягкий снег, находящийся в начальной стадии оседания
3. Снег, прошедший через оттепель
4. Перекристаллизовавшийся снег
5. Глубинная изморозь

Данная классификация частиц снега в составе снежного покрова, по моему мнению, не способствует глубокому изучению метелевого переноса, так как обобщение произведено достаточно грубо. Кроме того, в Международной классификации снега нет никаких сведений именно о метелевом снеге, и о дефляции снега в принципе, что также затрудняет выявление каких-либо закономерностей снегоперемещения.

Несмотря на то, что изучением структуры снега и снежного покрова исследователи занимаются уже не один десяток лет, информации о законах перемещения каждого типа частиц недостаточно. Тем более для исследования метелей наиболее важно знать не размеры отдельных частичек, а преобладающие размеры снежинок в толще снежного покрова в статистическом смысле, то есть гранулометрический состав.

### 2.3 Верхняя граница низовой метели

Одним из главных вопросов, возникающих при изучении низовой метели считается следующий: на какую максимальную высоту может подниматься снег, переносимый ветром с земной поверхности?

Первые попытки изучить законы метелевого переноса предпринимал Э.Д.Злотницкий. Но он не пытался измерить количество снега, которое может переноситься ветром при метелях, а ограничился общим заключением, что наибольшие массы снега перемещаются в приземном атмосферном слое.

В дальнейшем исследователями проводились эксперименты с целью выявления математических законов снегоперемещения. Так, В.В.Кузнецов впервые изобрел примитивный метелемер: прибор, по форме напоминающий ведро с круглым соплом. В ходе исследований он сделал вывод, что снегоперенос прямо пропорционален квадрату скорости ветра. Но фактические результаты наблюдений, их численные значения и анализ, на основе которого Кузнецов пришел к такому заключению, представлены не были.

Впоследствии Н.Е.Долговым также исследовалась метель с применением парового метелемера, в котором применялся принцип измерения объема талой воды, образовавшейся от отложившегося снега.

Наблюдения ученого дали результаты, представленные в таблице 2.3.1:

Таблица 2.3.1 – Зависимость расхода снега от силы ветра по Н.Е.Долгову

Скорость ветра по флюгеру, м/с	9,66	10,44	11,62	13,72	16,10
Твердый расход снега, г/м <sup>2</sup> *сек	10,3	360,3	90,3	82,61	102,5

Установить определенную закономерность между скоростью ветра и переносом снега по этим данным невозможно. Сам Н.Е. Долгов и вовсе ее отрицал. Такого же мнения придерживался и исследователь Н.Н.Изюмов.

Сейчас эти выводы кажутся парадоксальными, так как именно ветер играет главную роль в метелевом переносе. Неверные заключения первых исследователей объясняются тем, что им не были известны условия возникновения максимального расхода снега, а сконструированные ими метелемеры могли быть расположены и вне зоны разгона метели.

Затем измерения расхода снега проводились многими исследователями в разных районах нашей страны. Впоследствии, анализируя огромное количество полученных данных, было эмпирически установлено, что максимальные значения снегопереноса прямо пропорциональны кубу скорости ветра.

Н.П. Русин, проводивший многочисленные измерения метелей в Антарктиде, установил следующее: при метелях, наблюдающихся при скорости ветра 12 – 15 м/с (измеренной на высоте 6 м) расход метели в отдельных её слоях имел значения, представленные в таблице 2.3.2:

Таблица 2.3.2 – Расход метели в отдельных слоях приземного слоя атмосферы по Н.П.Русину

Высота нижней границы слоя, см	0	5	20	50	100	200	300
Высота верхней границы слоя, см	5	20	50	100	200	300	400
Твердый расход метели в слое, г/м <sup>2</sup> *сек	1111	278	111	55,6	27,8	11,1	5,6
Общий расход снега, г/м*сек	55,6	41,7	33,3	27,8	27,8	11,1	5,6

Проанализировав результаты своих наблюдений, Русин установил, что при дефляционной (низовой) метели снег не может подниматься ветром на высоту, превышающую 4 м.

Этот вывод сильно противоречит заключениям, сделанным Лёве, который утверждал, что верхний уровень дефляционной метели может достигать 300 м. С помощью измерений, полученных с использованием метелемерного ящика, он установил значение расхода снега, равное  $139 \text{ г/м}^2 \cdot \text{сек}$  на уровне 50 см надо льдом при скорости ветра 28 м/с. Эта величина близка к данным Русина на этой же высоте. Но Лёве посчитал верным распространить значение твердого расхода снега на слой атмосферы высотой 10 м, не имея для этого оснований. Также, в распоряжении ученого были данные метелевого расхода на высоте 1 м при значениях ветра 17,5 м/с, которые он счел разумным экстраполировать до уровня более чем 300 м. Данные выводы исследователя многими учеными считаются абсурдными, но серьезно никем не оспорены.

В. Меллор, также проводивший опыты в Антарктиде, установил высоту дефляционной метели, равную 43 м, получив при этом на 10-метровом уровне при ветре 29 м/с расход снега, имеющий порядок 1,5 десятка тысяч  $\text{г/м}^2 \cdot \text{сек}$ , что также является практически невозможным [4].

Разумеется, это далеко не полный список ученых, пытавшихся изучить метелевый перенос. Можно приводить еще множество теорий и попыток их обоснований, но ни одна гипотеза не была до сих пор неоспоримо доказана, поэтому не может быть принята в качестве опорной для исследования этой темы.

#### 2.4 Скорости ветра, соответствующие началу дефляционной метели

Изучив теории различных авторов, касающихся влияния скорости ветра на перенос снега, становится понятно, что единой неоспоримой закономерности не выявлено. Мнения ученых не сходятся также и в вопросе установления минимальной скорости ветра для начала дефляционной метели. Существующие формулы для определения пороговых скоростей ветра, необходимых для возникновения метелей, позволяют определять данные

величины чаще всего на уровне максимального снегопереноса, то есть непосредственно у поверхности земли. Но стандартные измерения параметров ветра проводятся на высоте 10 м, а неприемлемость экстраполяции в данном случае была доказана выше. Кроме того, параметры, включенные в уравнения такого типа (например, средний размер частиц в толще снега, величина твердого расхода и так далее) обязаны быть максимально точными. Теоретическое приближение в таком случае недопустимо, а измерение метелевых параметров инструментальными методами на сегодняшний день не осуществляется. Исходя из этих доводов, не считаю возможным использовать такого рода уравнения при разработке алгоритма, поэтому в данной работе они не рассматриваются.

В ходе этой работы были изучены экспериментальные данные по установлению начальных скоростей ветра, полученные различными исследователями. В общем виде их отражает таблица 2.4.1[4]:

Таблица 2.4.1 – Значения скоростей ветра, необходимых для начала метелевого переноса по экспериментальным данным различных исследователей

Фамилия исследователя	Скорость ветра при начале метели, м/с	Высота измерения скорости ветра, м	Характеристика снежного покрова
В.Ф.Жуков	7	2	Снег не покрывает полностью травянистую растительность
В.М.Котляков	5	10	Трава покрыта снегом полностью
Д.М.Мельник	8	–	Начало общей метели
Р.Н.Савельев	10	–	Ровная снежная поверхность

А.Х. Хргиан	5	2	Уплотненный слой снега
Г. Лильеквист	8 – 9	10	–

Данная таблица характеризует значения силы ветра, необходимые для возникновения минимального снегоперемещения вдоль земной поверхности, но не образования метели. Устанавливать численные закономерности по этим данным невозможно, но стоит отметить, что во всех случаях, независимо от времени лежания снега, минимальной для начала переноса является скорость ветра, равная 5 м/с.

Также анализировались более уточненные данные, содержащие информацию о влиянии скорости ветра на перенос снежинок разной плотности. Результаты анализа отражает таблица 2.4.2.

Таблица 2.4.2 – Влияние скорости ветра и температуры на перенос метелевых частиц различной структуры

Температура воздуха, °С	Средний размер снежных частиц	Структура снежного покрова	Скорость потока на высоте 5 см, м/с
-18,6	0,2	Тонкий слой снежинок на гладкой поверхности	2,1
-18,5	–	Отдельные снежинки на уплотненной и гладкой снежной поверхности	2,4
-19,0	0,6	Тонкий слой звезд на гладкой деревянной поверхности	2,9
-18,9	0,7	Звезды на рыхлом снежном покрове	2,9
-17,0	0,67	Звезды на рыхлом снежном покрове	2,9
-15,0	0,33	Тонкий слой снежинок на металлической поверхности	2,91

-5,3	0,51	Звезды на рыхлом снежном покрове	4,64
-8,0	0,51	Звезды на рыхлом снежном покрове	4,68
-7,3	0,46	Звезды на рыхлом снежном покрове	4,93
-18,8	–	Толстый слой звезд на ледяной поверхности	5,83
-19,9	0,55	Пластинки на рыхлом снежном покрове	6,07
-18,7	–	Естественный снежный покров, взятый из сугроба	7,89
-18,5	–	Уплотненный слой звездчатого снега	8,93
-19,0	0,6	Уплотненный слой звездчатого снега	18,7
-18,5	0,6	Уплотненный слой звездчатого снега	26,4
-18,5	–	«Ветровая доска»	37,1

Эти данные показывают, что даже при самых благоприятных условиях для возникновения метелевого переноса (при свободном размещении мелких метелевых частиц на скользкой гладкой поверхности) перемещение снега зафиксировано лишь при значениях скорости 2 м/с. Более уплотненный слой снега с еще большим трудом переносится ветром. А «ветровая доска», возникающая при сублимационном твердении, не поддается дефляции даже при скорости ветра 37 м/с (измеренной на высоте 5 см)[4].

Это говорит о том, что в процессе автоматизации данного атмосферного явления необходимо обращать внимание на структуру и плотность лежащего снега, и зависимость условий начала переноса от скорости ветра.

### 3. Разработка алгоритма для автоматического распознавания BLSN в коде METAR

Прежде чем приступить к написанию самого алгоритма, необходимо понимать, что именно подразумевает обозначение BLSN в сводке METAR. В авиационной метеорологии данное сокращение расшифровывается как «низовая метель».

Однако, как уже было доказано в главе 2, единого определения, содержащего численные критерии для идентификации явления, до сих пор не принято. Поэтому в этом случае мы можем опираться только на руководящие документы ИКАО, которыми являются инструктивные материалы METAR[1].

В них указано, что дескриптор BL («низовой») следует использовать с сокращением SN, в том случае, если наблюдается ухудшение видимости за счет снега, переносимого с поверхности земли на 2 м и более. В случае, если во время низовой метели наблюдается снегопад, то передаются оба явления в виде «SN BLSN» (при наличии информации об интенсивности снегопада, она также указывается в данной группе в соответствии с правилами кодирования, изложенными в главе 1). Кроме этого, даны минимальные значения скорости ветра, при которой возможно включение дескриптора BL – 6 м/с.

Таким образом, критериями для включения BLSN по ИКАО являются лишь значение скорости ветра, и высота, на которой зафиксировано ухудшение видимости за счет снегопереноса.

Данные указания по факту являются лишь рекомендациями для метеонаблюдателей, которые в настоящее время вносят атмосферные явления на аэродроме в сводку METAR, опираясь зачастую лишь на свои личные представления об этих явлениях.

Естественно, для автоматизации распознавания метелей этих данных недостаточно, и далеко не всегда наличие этих двух критериев может



служить доказательством наличия этого явления на аэродроме. И для повышения вероятности верного кодирования BLSN необходимо устанавливать как можно больше численных критериев различных метеорологических параметров, оказывающих влияние на возникновение этого атмосферного явления.

Изучив теорию метелевого переноса, становится очевидно, что физика процесса очень сложна. Недостаточность экспериментальных исследований, большая погрешность проводившихся опытов, недостаточная обоснованность выводов, к сожалению, исключают возможность установления однозначных закономерностей влияния различных метеовеличин на параметры снегопереноса.

По этим причинам единственной возможностью разработать алгоритм для распознавания метелей автоматическими системами в нашем случае является применение принципа машинного обучения. Суть данного метода заключается не в прямом решении поставленной задачи, а в установлении закономерностей, выявленных при исследовании решений большого множества похожих задач. В данной работе такие закономерности были выявлены на основе анализа данных математической статистики.

Для реализации вышеупомянутого метода машинного обучения были обработаны ежеминутные погодные данные аэродрома Пулково за 2016 - 2018 гг, автоматически выдаваемые системой КРАМС-4. Целесообразным является анализ «холодных» месяцев, во время которых обычно наблюдаются метели на исследуемой территории – ноябрь, декабрь, январь, февраль, март.

Для создания алгоритма была обработана выборка, включающая 648 000 ежеминутных данных, содержащих информацию о значениях температуры воздуха; наличия осадков с указанием их интенсивности; величину скорости, направлении и порывов ветра; видимость; высоту облачности; явления погоды; давление.

Суть работы заключалась в том, чтобы установить четкие значения всех исследуемых метеопараметров, при которых автоматическая система должна включать указатель BLSN в группу текущей погоды кода METAR.

Метель любого вида – очень редкое явление, возникающее, на мой взгляд, при достаточно ограниченном спектре погодных условий. За 480 рассматриваемых суток явление низовой метели со снегопадом различной интенсивности (а именно, «SN BLSN», «+SN BLSN», «-SN BLSN», «SHSN BLSN», «+SHSN BLSN», «-SHSN BLSN») было зафиксировано метеонаблюдателями на аэродроме Пулково 43 раза, в то время как низовая метель без снегопада «BLSN» наблюдалась всего 5 раз. Поэтому на основе предоставленных данных в ходе работы будет изучено только явление низовой метели со снегопадом.

Проанализировав ежеминутные данные за 15 месяцев, можно выявить несколько закономерностей.

1. Во время низовой метели со снегопадом должен быть зафиксирован снег любой интенсивности, выпадающий из облаков во время наблюдения. Причем отдельно стоит отметить недопустимость кодирования метелей в случае наблюдения осадков жидкой фазы, таких как дождь («RA»), а также смешанных осадков, например дождь со снегом, снег с дождем любой интенсивности и др.

2. Все случаи возникновения исследуемого явления наблюдались при температурах ниже 1°С. Так как ни в научной литературе, ни в инструктивных материалах нет значений температуры, выше которых исключается возможность появления метелей, также как и не существует однозначных значений температур, позволяющих с уверенностью говорить о фазе выпадающих осадков, в качестве температурного максимума будет принята величина 1 градус Цельсия.

3. Согласно руководящим документам ИКАО, сокращение «BLSN» допустимо употреблять при скорости ветра не менее 6 м/с. Однако, проанализировав данные, стало ясно, что это правило не всегда

добросовестно соблюдается, и зачастую можно увидеть обозначение низовой метели при ветре 5 м/с, а иногда и 4 м/с. Это лишь подтверждает предположение, что в настоящее время при определении атмосферных явлений наблюдатели зачастую основываются на своих собственных представлениях о них. Поэтому, несмотря на данные статистики, считаю нужным придерживаться минимальных значений скорости ветра, установленных ИКАО, то есть 6 м/с.

Скорость ветра играет, на мой взгляд, ключевую роль в метелевом переносе, поэтому этот параметр должен рассматриваться более подробно. Естественно, возможно множество способов и принципов задания критериев силы ветра, но я решила предложить свой вариант. Он заключается в следующем: данные скорости ветра автоматически осредняются системой за каждую минуту, после чего происходит оценка полученных величин.

Учитывая исходные данные, можно установить следующее:

Если в течение 5 минут, предшествующих сроку формирования сводки, скорость ветра достигала значений более или равных 10 м/с, то следует фиксировать явление SN BLSN (либо «+SN BLSN», «-SN BLSN», «SHSN BLSN», «+SHSN BLSN», «-SHSN BLSN», в зависимости от интенсивности осадков).

Если в течение 15 минут, предшествующих сроку формирования сводки, скорость ветра была в пределах 6 – 9 м/с, то фиксируется SN BLSN (либо «+SN BLSN», «-SN BLSN», «SHSN BLSN», «+SHSN BLSN», «-SHSN BLSN», в зависимости от интенсивности осадков) при условии, что в течении как минимум 12 из 15 минут, предшествующих формированию сводки, наблюдался снегопад.

Если же в момент формирования сводки скорость ветра находится в пределах от 0 до 5 м/с, согласно требованиям ИКАО метель не может включаться в сообщение METAR.

По исходным данным была построена гистограмма (Рис. 3.1), наглядно показывающая количество случаев, при которых при которых

метеонаблюдатели фиксировали низовую метель со снегопадом на аэродроме Пулково при различных значениях скорости ветра:



Рисунок 3.1 – Гистограмма возникновения метелей при различных значениях скорости ветра

Согласно исходным данным, нельзя уверенно говорить об однозначной зависимости появления метелей от силы ветра, ведь, как уже говорилось в главе 2, на возникновение данного явления оказывают влияние также наличие или отсутствие снегопада, температура воздуха, плотность снежного покрова и другие, неучтенные в гистограмме, факторы. Но стоит отметить, что в 65 % случаях явление SN BLSN включалось в сводку METAR при скорости ветра, превышающей 10 м/с.

1. В ходе данной работы производились попытки выявить и влияние других метеопараметров (влажность воздуха, давление, направление ветра) на возникновение и развитие метелевого переноса. Но, к сожалению, изменение этих величин за время жизни метели очень незначительно, и не оказывает влияния на данное явление.

На основе анализа большого количества статистических данных, полученных выводов, с учетом рекомендаций ИКАО был составлен алгоритм

(Рис. 3.2), результатом которого будет включение в сводку METAR явления «низовая метель со снегопадом». Схематично он выглядит следующим образом:

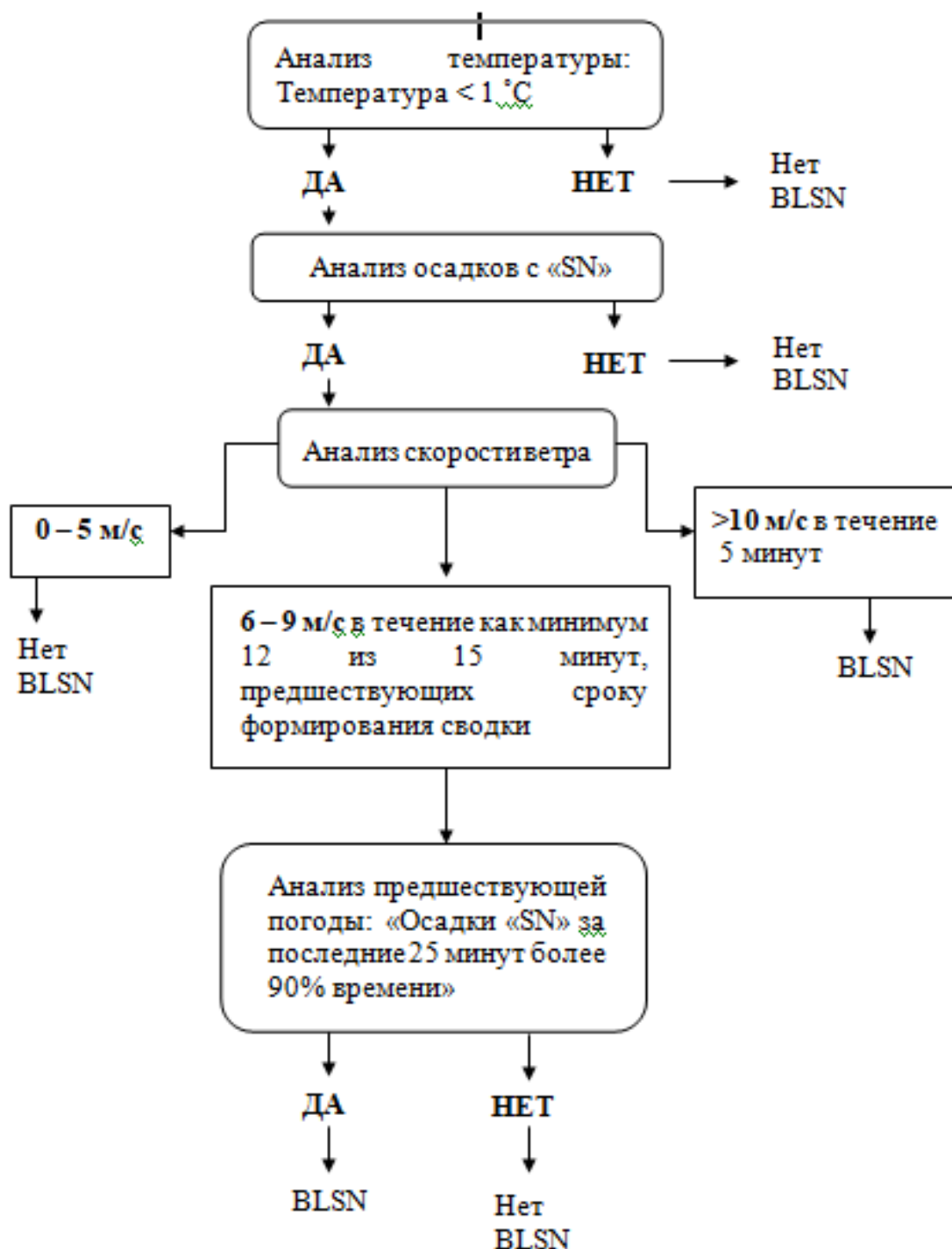


Рисунок 3.2 – Алгоритм для распознавания низовой метели со снегопадом автоматической метеостанцией

Результатом данного алгоритма при всех положительных условиях будет включение в группу текущей погоды сводки METAR явления «низовая метель со снегопадом» в виде: SN BLSN /-SN BLSN /+SN BLSN /SHSN BLSN/ +SHSN BLSN/ -SHSN BLSN (одно из перечисленного в зависимости от интенсивности выпадающего снега).

Главным недостатком представленного алгоритма является вероятность возникновения ошибки, связанной с определением явлений «поземок со снегопадом», «сильный снегопад, проходящий без переноса снега с поверхности земли» как «низовая метель со снегопадом». На данный момент наблюдения за видимостью происходят на высоте около 2.5 м. Ухудшение видимости на такой высоте, конечно, может свидетельствовать о наличии низовой метели, так как ее верхняя граница выше 2 м. Но также существует вероятность того, что наблюдается сильный снегопад при умеренной скорости ветра без переноса снега с поверхности земли, тогда включение BLSN в сводку будет ошибочным. Возможна и обратная ситуация, когда подъем снега с земной поверхности будет происходить до высоты 2 м, чего датчики видимости в настоящий момент, конечно, не зафиксируют. На мой взгляд, данную ошибку возможно устранить введением градиентных наблюдений за видимостью: на высоте ниже 2 м (оптимально 1 м) и выше 2 м, и проводить оценку видимости на основании сравнения двух результатов.

Разумеется, это не является готовой действующей схемой, однозначно дающей верный результат, так как на данный момент ощущается недостаточность как теоретической информации, полностью описывающей физику процесса, так и нехватка экспериментальных данных. Но это может служить толчком для дальнейшего решения проблем такого рода, главным образом, за счет увеличения количества измерений и правильной их оценки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы было установлено, что на сегодняшний день полностью доверить работу метеонаблюдателя на аэродромах автоматической метеостанции, к сожалению, невозможно. Несмотря на очевидное преимущество машин в точном и оперативном измерении метеорологических параметров, они не в состоянии достоверно распознать многие атмосферные явления, так как физика их образования очень сложна и не изучена в полном объеме даже человеком.

Самый логичный выход из данной ситуации – использовать алгоритмы, созданные профессионалами на основе совмещения анализа множества экспериментальных данных, личного опыта и неоспоримых теоретических сведениях о явлениях.

В данной работе представлен алгоритм для автоматического распознавания низовой метели со снегопадом, разработанный по принципу машинного обучения. Проверка на независимой выборке показала, что вероятность верного определения исследуемого явления с помощью предложенного алгоритма составляет 93 %. Но говорить с уверенностью о возможности или невозможности его использования в практических целях на данный момент невозможно, так как для выявления однозначных закономерностей, разумеется, требуется большее количество опытов.

Также стоит установить дополнительные датчики для исследований, чтобы эмпирическим путём проверить корректность работы всей системы. Однако уже сейчас очевидно, что попытка автоматического распознавания низовой метели является толчком для полной автоматизации процесса наблюдений на аэродроме, что, несомненно, должно улучшить качество работы метеорологической службы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструктивный материал по кодам METAR, SPECI, TAF – М.,: 72 с
2. Бочарников Н.В., Гусев С.О., Никишков П.Я., Солонин А.С. «Метеорологические измерения на аэродромах» / Институт радарной метеорологии – СПб.: Гидрометеиздат, 2008. – 427 с
3. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации. Приложение 3 – Конвекции о международной гражданской авиации. Издание пятнадцатое
4. Дюнин А.К. «Механика метелей» – Новосибирск: Издательство Сибирского отделения Академии наук СССР, 1963. –375 с
5. Бычкова В.И. Параметризация процессов возникновения и эволюции низовой метели: дис. канд. физ.-мат. наук: 25.00.30 –М.,2016, 143с.
6. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. Издание шестое. Док. ВМО №8. –Женева, изд. ВМО,2000, 305 с



